

О. І. ШЕРЕМЕТ**АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТРАДИЦІЙНИХ ТА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ СИНТЕЗУ
АВТОМАТИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

Розглянуто передумови виникнення та особливості сучасних підходів щодо синтезу автоматизованих електромеханічних систем. Встановлено, що сучасний етап розвитку автоматизованих електромеханічних систем характеризується постановкою складних задач керування. Деякі із сучасних задач керування повинні розв'язуватись за умов неточної або неповної інформації про об'єкт. Виконано критичний аналіз і класифікацію традиційних та сучасних методів синтезу автоматизованих електромеханічних систем та зроблено відповідні висновки.

Ключові слова: синтез, автоматизована електромеханічна система, регулятор, штучний інтелект, нейронна мережа, нечітка логіка.

А. И. ШЕРЕМЕТ**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ТРАДИЦИОННЫХ И СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рассмотрены предпосылки возникновения и особенности современных подходов к синтезу автоматизированных электромеханических систем. Установлено, что современный этап развития автоматизированных электромеханических систем характеризуется постановкой сложных задач управления. Некоторые из современных задач управления должны решаться в условиях неточной или неполной информации об объекте. Выполнен критический анализ и классификация традиционных и современных методов синтеза автоматизированных электромеханических систем и сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: синтез, автоматизированная электромеханическая система, регулятор, искусственный интеллект, нейронная сеть, нечёткая логика.

О. I. SHEREMET**ANALYTICAL REVIEW OF TRADITIONAL AND MODERN METHODS OF
AUTOMATED ELECTROMECHANICAL SYSTEMS SYNTHESIS**

The preconditions of occurrence and features of modern approaches to the synthesis of automated electromechanical systems are considered. It is established that the present stage of development of automated electromechanical systems is characterized by the formulation of complex control problems. Some of the modern control problems should be solved in the face of inaccurate or incomplete information about the object. The critical analysis and classification of traditional and modern methods of synthesis of automated electromechanical systems was carried out. In order to solve common problems of electric drive management, which often arise in engineering practice, universal methods of synthesis are used, which means binding to standard forms of characteristic polynomials. A more convenient and illustrative option to provide the system of desired properties in static and dynamic regimes is the task of the desired transitive function, which is not selected by the designer from a certain list of standard forms at the stage of synthesis of regulators of the automated electromechanical system, and is given solely on the basis of on technological requirements and possibilities of technical realization on this type of equipment. Such a transition function may change in the process of functioning of a machine, mechanism or technological complex, quantitatively and qualitatively providing new properties to an automated electromechanical system. The discrete time equalizer method has considerable prospects in this sense.

Keywords: synthesis, automated electromechanical system, regulator, artificial intelligence, neural network, fuzzy logic.

Вступ. Історично склалося так, що більшість методів синтезу автоматизованих електромеханічних систем теоретично сформувалися та отримали подальший розвиток у другій половині ХХ сторіччя. Обчислювальні можливості комп'ютерної техніки в той час були у сотні тисяч разів нижчими, ніж зараз. У відповідності до закону Мура швидкодія мікропроцесорів за останні 30 років зросла у 3500 разів, а модифікації архітектури призвели до збільшення продуктивності у 50 разів. Крім того, особливо актуальною є ідея виконання багатопотокових процесів, що реалізуються шляхом розпаралелення обчислень та операцій вводу-виводу. Цьому сприяє розвиток багатоядерних процесорних архітектур та технологій, що реалізують віртуальну багатоядерність.

Саме завдяки багатопроцесорності та багатоядерності кожного процесора сучасні суперкомп'ютери є надпотужними та мають здатність виконувати десятки квадрильйонів операцій з плаваючою точкою на секунду. Звісно, що такі обчислювальні потужності не потрібні для більшості автоматизованих електромеханічних систем, але й сучасні промислові комп'ютери та мікроконтролери зазнали суттєвих змін і пропонують користувачеві принципово нові можливості для програмної реалізації алгоритмів керування. Завдяки бурхливому розвитку комп'ютерної техніки та вдосконаленню програмних засобів на початку 80-х років ХХ сторіччя, у різних областях науки та техніки починають використовуватись системи керування з ознаками штучного інтелекту.

Метою роботи є виконання критичного аналізу традиційних та сучасних методів синтезу автоматизованих електромеханічних систем, а також здійснення їх умовної класифікації за призначенням.

Критичний аналіз традиційних методів синтезу. Методи синтезу електромеханічних систем не виникали з нічого. Кожен з них ґрунтується на технічних вимогах щодо експлуатації об'єктів керування, залежить від рівня автоматизації технологічних процесів, обмежується можливостями силових перетворювачів та електричних двигунів. Деякі з традиційних методів синтезу вочевидь розроблялися з розрахунку на зна-

чно нижчий рівень розвитку комп'ютерів та силової електроніки, для окремих у минулому були сформовані засадничі аспекти, а повноцінної реалізації вони здобули вже у сучасності. Так чи інакше, будь-який з методів синтезу вирішує поставлені перед ним задачі та має як позитивні сторони, так і негативні. Проаналізуємо переваги та недоліки наявних методів синтезу автоматизованих електромеханічних систем.

Недоліки методів синтезу, що базуються на логарифмічних частотних характеристиках:

- потребують графічного побудування логарифмічних частотних характеристик як бажаної, так і вихідної системи, внаслідок чого проєктанту доводиться або користуватись спеціалізованими комп'ютерними графічними редакторами, або виконувати креслення на папері;

- низька придатність до програмної реалізації алгоритму синтезу;

- відсутність простого та наочного зв'язку між частотною характеристикою бажаної системи та її перехідною функцією;

- передбачається синтез регулятора з незмінною структурою та параметрами;

- для виконання синтезу потрібно користуватись спеціальними таблицями типових бажаних логарифмічних частотних характеристик;

- побудування логарифмічних частотних характеристик та операції над ними завжди виконуються наближено.

Загалом, синтез за частотними характеристиками є морально застарілим і в наш час не може вважатись корисним для розв'язання широкого кола практичних задач, проте частотні методи все ще застосовують для експериментального визначення реакції системи на синусоїдальні впливи різної частоти та амплітуди.

Дещо краще із сучасної позиції виглядає метод розширених частотних характеристик, що дозволяє розраховувати параметри налаштування регуляторів з різними законами регулювання для будь-якого ступеня затухання. Він є більш універсальним та наочним, проте більшість зазначених вище недоліків синтезу за частотними характеристиками йому теж притаманна.

Недоліком кореневого методу синтезу є необхідність опосередкованого пов'язання домінуючих полюсів (найбільш впливових) з бажаною формою перехідної функції. Крім того потрібно заздалегідь задавати структури регуляторів та варіювати їх параметри під час синтезу, що значно обмежує можливості проєктанта. Вже при порядку характеристичного рівняння вище третього процес синтезу значно ускладнюється. Таким чином, кореневий метод синтезу не є перспективним і вже відіграв свою історичну роль.

Логічним розвитком корневих методів став метод корневих годографів, що має наступні переваги:

- траєкторія коренів при змінненні одного з параметрів системи (кореневий годограф) легко визначається за допомогою програмних засобів, причому в більшості випадків потрібні функції вже вбудовані до спеціалізованих програмних пакетів (наприклад, функція `roots` з `MATLAB`);

- дозволяє одержувати необхідну інформацію про стійкість та динамічні показники системи;

- надає можливість визначення того, яким чином потрібно варіювати змінюваний параметр системи, коли положення коренів характеристичного рівняння не задовольняють висунутим технічним вимогам.

Проте, попри всі свої позитивні риси, метод кореневого годографа має й суттєві недоліки:

- обмеженість кількості параметрів, які можна варіювати при синтезі: зазвичай можна змінювати один-два параметри, при більшій кількості параметрів задача стає багатовимірною та значно ускладнюється;

- можливість використання лише для лінійних систем;

- в більшості випадків доступність до варіації лише коефіцієнта підсилення регулятора, структура якого передбачається відомою проєктанту та не може бути визначеною у результаті синтезу.

В цілому, метод кореневого годографа не має претензій на універсальність та гнучкість. В більшості випадків він є придатним лише для налаштування одного-двох параметрів регулятора із заздалегідь відомою структурою, тому в інженерній практиці виконує лише допоміжні функції.

Безумовною перевагою методу стандартних коефіцієнтів є його простота: він не потребує ні складних розрахунків, ні графічних побудов. Потрібні параметри регуляторів знаходяться шляхом прирівнювання коефіцієнтів при відповідних степенях операторів Лапласа наявної та еталонної передатних функцій, що породжує наступні недоліки:

- відсутність універсальності: пошук розв'язків задачі синтезу ведеться лише серед так званих «еталонних» передатних функцій, множина яких може й не мати потрібного екземпляра;

- неможливість у деяких випадках розв'язати систему рівнянь, за допомогою якої визначають шукані параметри регуляторів;

- обмеженість можливостей структурного синтезу;

- придатність до використання лише у лінійних електромеханічних системах.

Вдосконаленим варіантом методу стандартних коефіцієнтів є метод стандартних характеристичних поліномів або стандартних форм. Цей метод широко використовується для синтезу регуляторів у системах з підпорядкованим регулюванням координат та у системах з модальним керуванням.

Зазвичай системи з підпорядкованим регулюванням координат синтезуються згідно з розподілом коренів характеристичного рівняння за модульним або симетричним оптимумом. Масове застосування систем підпорядкованого регулювання координат у інженерній практиці обумовлене наступними перевагами:

- простота налаштування регуляторів на деякий оптимум;

- незалежність в обмеженні кожної з регульованих координат;

- можливості використання уніфікованих пристроїв керування.

Негативним фактором при використанні систем з підпорядкованим регулюванням координат є зниження швидкодії системи з причини послідовної передачі керуючого впливу через контури, а не одразу на об'єкт керування.

Коли автоматизована електромеханічна система описується у просторі станів, то виникає можливість розташувати її полюси потрібним чином, створивши лінійні зворотні зв'язки за вектором станів або так званий «регулятор станів» [1]. Саме регулятори станів стали основою для створення систем модального керування зі спостерігачами, що використовуються для оцінювання координат, вимірювання яких є складним або взагалі неможливим [2].

Одним з підходів, орієнтованих на синтез регуляторів станів є метод розташування полюсів для замкнених систем автоматичного керування з повним зворотним зв'язком за станами, заснований на використанні формули Аккермана [3]. Цей метод дозволяє визначити матрицю коефіцієнтів зворотних зв'язків, виходячи з математичного опису системи автоматичного керування у просторі станів та бажаного розташування коренів характеристичного рівняння. Теоретично такий підхід дозволяє нескінченно збільшити швидкодію системи без погіршення показників якості, проте на практиці швидкодія обмежується максимально допустимими значеннями коефіцієнтів зворотних зв'язків за станами. Крім того, всі координати вектора станів при такому підході повинні бути доступними для вимірювання.

Безумовно, модальне керування електромеханічними системами має свої переваги:

- синтезована система з модальним керуванням не потребує перевірки на стійкість;
- немає необхідності в додатковому застосуванні якихось коректуючих пристроїв, оскільки показники якості визначаються використаним під час синтезу бажаним стандартним характеристичним поліномом;
- введення безінерційних зворотних зв'язків не підвищує порядку об'єкта керування.

В якості недоліків систем з модальним керуванням можна зазначити наступні:

- існує можливість отримання у результаті синтезу системи з високою параметричною чутливістю;
- відсутність структурних можливостей щодо обмеження змінних стану у деякому діапазоні;
- складніше, ніж у системах з підпорядкованим регулюванням, виконується налаштування та діагностика;
- при наявності у складі об'єкта керування суттєвих нелінійностей можливо синтезувати модальний регулятор лише за умови їх лінеаризації у деякому діапазоні значень.

Відносно методів синтезу, які використовуються для створення оптимальних автоматизованих електромеханічних систем, можна зазначити, що більшість з них так чи інакше базується на класичних оптимізаційних алгоритмах: варіаційному обчисленні, принципі максимуму Л. С. Понтрягіна, динамічному програмуванні Р. Беллмана, аналітичному конструюванні

регуляторів. При цьому одержуваний регулятор частіше за все описується рівняннями у просторі станів.

Доволі складно порівнювати позитивні та негативні сторони методів синтезу оптимальних регуляторів, оскільки вони мають різномірну направленість і залежать від особливостей електромеханічних об'єктів, проте можна стверджувати, що їм узагальнено притаманні наступні особливості:

- складність процесу синтезу, відсутність наочності деяких стверджень, проблеми фізичної реалізації оптимальних регуляторів;
- відсутність універсальних підходів щодо синтезу;
- виконання радше доповнюючої оптимальної функції керування, ніж основної, визначеної вимогами до технологічного процесу.

Сучасні перспективні підходи щодо синтезу автоматизованих електромеханічних систем. Сучасний етап розвитку автоматизованих електромеханічних систем характеризується постановкою складних задач керування, при цьому деякі з них повинні розв'язуватись за умов неточної або неповної інформації про об'єкт керування. Як правило, такі системи включають до свого складу об'єкт керування у вигляді незмінної частини та регулятор або коректуючий пристрій, що реалізується програмно та має можливість динамічно змінювати свою структуру та параметри в залежності від технологічних вимог.

Першою теоретичною засадою, на яку спиралися системи керування з ознаками штучного інтелекту, стали роботи Л. А. Заде, який у 1965 році запропонував теорію нечітких множин [4]. Створені на базі цієї теорії концепції представлення інформації суттєво розширили можливості алгоритмів, що реалізуються програмним шляхом. Одна з таких концепцій знаходить відображення у нечіткому керуванні або фазі-керуванні.

Фазі-регулятори дозволяють реалізовувати як лінійні, так і нелінійні залежності сигналів керування від множини вхідних сигналів. В окремих публікаціях стверджується, що нечітка логіка дозволяє забезпечити більшу робастність систем автоматичного керування, ніж традиційне керування, проте ніяких спеціальних досліджень цього питання не виконувалося [5]. Фактично, ступінь робастності системи буде залежати від тих фазі-правил, які були закладені в нечіткому регуляторі під час його проектування.

Стосовно електромеханічних систем розрізняють нижній та верхній рівні фазі-керування. На нижньому рівні фазі-керування виконується безпосередньо електроприводом та може бути як основним, так і допоміжним засобом керування, що покращує роботу регуляторів, синтезованих одним з традиційних методів синтезу. На верхньому рівні фазі-регулятор виконує керування технологічним процесом, впливаючи на взаємозв'язану систему електроприводів.

Фазі-регулятори використовують для створення адаптивних робастних електромеханічних систем [6], оптимальних електроприводів [7], нелінійних та багатомасових систем, що містять обмеження регулюва-

них координат [8].

Окремі можливості для синтезу систем керування з ознаками штучного інтелекту надають сучасним дослідникам нейронні мережі, які являють собою обчислювальні структури, що будуються за нейробіологічними принципами.

У сучасному розумінні під штучною нейронною мережею розуміють певним чином поєднану сукупність нейронів, що взаємодіє із зовнішнім середовищем та реалізується програмним шляхом. Кожен з нейронів, що входить до складу мережі, утворює з іншими нейронами так звані синаптичні зв'язки, які можуть підсилювати сигнал керування чи навпаки – зменшувати.

Перед використанням будь-якої штучної нейронної мережі у робочому режимі потрібно виконати її навчання. Завдяки можливості навчання, штучні нейронні мережі мають здатність адаптуватись до змінних умов зовнішнього середовища.

Широкого розповсюдження для навчання нейронних мереж набув алгоритм зворотного поширення помилки, який за своєю сутністю є локальною оптимізаційною процедурою, внаслідок чого у складних завданнях навчання буде тривалим або взагалі може не відбутись.

Останнім часом дослідники пов'язують майбутнє штучних нейронних мереж з генетичним алгоритмом навчання, який є методом глобальної оптимізації та виконує послідовний підбір, комбінування та варіювання невідомих параметрів, забезпечуючи адаптаційні змінення за механізмами, подібними до біологічної еволюції [9].

Нейронні мережі використовують для усунення фрикційних автоколивань у одномасових та двомасових електромеханічних системах з нелінійним навантаженням або від'ємним в'язким тертям [10, 11], для параметричної ідентифікації об'єктів керування [12, 13] та виконання оптимального налаштування поліноміальних регуляторів [14].

Якщо фазі-регулятор розглядати як систему паралельних обчислень, то її можна представити у вигляді нейронної мережі, кожен вузол якої виконує специфічну операцію нечіткої обробки інформації. В цьому разі для налаштування фазі-регулятора можна використовувати стандартні методи навчання штучних нейронних мереж, а одержувані в результаті такого підходу обчислювальні структури прийнято називати гібридними нейронними мережами [15, 16].

Окрім розвитку методів синтезу автоматизованих електромеханічних систем з ознаками штучного інтелекту, продовжують розвиватись й інші напрямки, які орієнтовані на забезпечення потрібних показників якості керування при нечутливості до зовнішніх збурень та параметричних змінень у об'єкті керування.

В цьому сенсі перспективним напрямком залишається розривне нелінійне керування [17]. Першими електромеханічними системами з розривним керуванням стали релейні системи, які передбачають використання двопозиційних регуляторів («увімкнено/вимкнено»). Особливості синтезу релейних регуляторів

для автоматизованих електромеханічних систем, у тому числі оптимальних, ілюструють роботи [18–20].

Зазвичай синтез систем з розривним керуванням зводиться до побудування поверхонь перемикання у фазовому просторі, на яких функції керування мають розриви [21]. На поверхнях перемикання при деяких параметричних співвідношеннях виникають ковзні режими. В таких режимах перемикання між структурами регуляторів виконується теоретично з нескінченно великою частотою, яка практично обмежується можливостями перетворювальної техніки та апаратної реалізації алгоритму керування. У ковзному режимі утворюється своєрідна динамічна рівновага: точка, що відображає параметри системи у фазовому просторі, при попаданні на поверхню розриву вже не може з неї зійти, оскільки всі фазові траєкторії так чи інакше ведуть до цієї поверхні. Ковзні режими можуть виникати як у релейних системах, так і у системах зі змінною структурою.

Можливостям практичного застосування ковзних режимів керування у електромеханічних системах в значній мірі сприяли успіхи у розвитку силових електроніки, що знайшли початок наприкінці XX сторіччя та продовжуються до сьогодення. Перш за все, завдяки покращенню параметрів потужних польових транзисторів (MOSFET) та транзисторів з ізольованим затвором (IGBT) з'явилися сучасні високочастотні силові перетворювачі, які є основою для реалізації автоматизованих електромеханічних систем з розривним керуванням.

Впродовж останніх двох-трьох десятиріч зусилля багатьох дослідників сконцентровані на оптимальному та багатовимірному релейному керуванні, яке також називають керуванням у ковзних режимах або розривним керуванням [22]. У англійській літературі релейне керування називають «bang-bang control», «on-off control» або «hysteresis control» [23]. Деяка невизначеність у термінології вказує на інтенсивний розвиток цього напрямку та відсутність єдиного канонічного підходу до синтезу електромеханічних систем з регуляторами, що забезпечують ковзні режими роботи.

Доцільність використання сучасних методів синтезу автоматизованих електромеханічних систем. Синтез автоматизованих електромеханічних систем з фазі-регуляторами або штучними нейронними мережами є доцільним у випадку наявності суттєво неточної або неповної інформації про об'єкт керування. Коли ж формальний опис об'єкта керування не становить проблеми, то при побудованні регулятора в більшості випадків краще користуватись детермінованими алгоритмами, враховуючи наступні факти:

- суперечливість правил, за якими працює фазі-регулятор, оскільки вони формуються експертним шляхом, що вносить деякий суб'єктивізм в алгоритм керування;

- цілкова залежність алгоритмів роботи штучних нейронних мереж від якості виконання навчання: від об'єму та характеру наповнення бази знань, кількості епох навчання, похибки навчання тощо.

Системи з розривним керуванням описуються диференціальними рівняннями із розривами функцій у правих частинах, внаслідок чого утворююча точка, що характеризує миттєві значення координат, буде рухатись за частинами фазових траєкторій, а при певному співвідношенні параметрів цей рух відбувається у ковзному режимі. Такий математичний сенс якнайкраще підходить для побудовання оптимальних систем за швидкістю та точністю. Внаслідок діючих обмежень, навіть класичні підходи щодо синтезу оптимальних систем дають кусково-монотонні керуючі функції, тому природніше одразу використовувати алгоритми, орієнтовані на дискретний характер керуючих впливів.

Безумовно, автоматизовані електромеханічні системи з розривним керуванням, а зокрема системи з релейними регуляторами, що працюють у ковзних режимах, мають великий потенціал щодо реалізації оптимальних законів керування. Проте їм бракує універсальності та гнучкості у розв'язанні тривіальних задач керування електроприводами. З цієї причини в інженерній практиці найчастіше користуються системами з підпорядкованим регулюванням або системами з модальним керуванням (у тому числі зі спостережачими станів), які ґрунтуються на теорії стандартних характеристичних поліномів.

Умовна класифікація методів синтезу автоматизованих електромеханічних систем. Не дивлячись на велику кількість різноманітних методів синтезу регуляторів для керування автоматизованими електромеханічними системами, можна умовно виділити п'ять груп методів за призначенням (за такою логікою окремі методи можна віднести одразу до двох груп):

1. Неактуальні методи синтезу, які мали практичний сенс у минулому, проте, в більшості випадків, дали підґрунтя для розвитку сучасних підходів щодо створення регуляторів;

2. Вузькоспеціалізовані методи синтезу, направлені на створення автоматизованих електромеханічних систем, нечутливих до параметричних збурень, багатоканальних прецизійних систем, взаємозв'язаних електроприводів тощо;

3. Методи синтезу для систем з об'єктом керування, формалізація якого ускладнюється відсутністю всієї необхідної інформації про нього або наявністю лише спотворених даних;

4. Методи синтезу, призначені для забезпечення найкращих показників якості керування, у деякому сенсі – методи синтезу оптимальних систем, найбільш перспективними серед яких є ті, що забезпечують розривні закони змінення керуючої дії;

5. Універсальні методи синтезу, широко використовувані в інженерній практиці для розв'язання найбільш загальних задач керування електроприводами.

Звісно, що в даному випадку термін «універсальний метод синтезу» використовується лише в умовному значенні для відокремлення найбільш поширених автоматизованих електромеханічних систем, синтез та налаштування регуляторів яких виконується за стандартними характеристичними поліномами.

Висновки. Виходячи із зазначеного вище, можна зробити висновок, що для розв'язання загальних задач керування електроприводами, які найчастіше постають у інженерній практиці, використовуються універсальні методи синтезу, а це означає прив'язку до стандартних форм характеристичних поліномів. Стандартні поліноми дозволяють досить грубо задавати потрібні динамічні властивості системи: при різних способах розташування полюсів можна одержати майже ідентичні перехідні процеси.

В загальному випадку, під час синтезу системи автоматичного керування на базі стандартного характеристичного полінома динамічні властивості системи визначаються його коефіцієнтами, які не змінюються в процесі функціонування. Стандартні поліноми не можуть врахувати динамічні особливості реальних систем автоматичного керування, оскільки їх поведінка є заздалегідь заданою розподілом полюсів, тобто коефіцієнтами полінома.

Більш зручним та наочним варіантом надання системи бажаних властивостей у статичних та динамічних режимах (при відмові від використання стандартних характеристичних поліномів) є завдання бажаної перехідної функції, яка не обирається проектантом з деякого переліку стандартних форм на етапі синтезу регуляторів автоматизованої електромеханічної системи, а задається виключно виходячи з технологічних вимог і можливостей технічної реалізації на даному типі обладнання. Така перехідна функція може змінюватись у процесі функціонування машини, механізму або технологічного комплексу, кількісно та якісно надаючи нових властивостей автоматизованій електромеханічній системі. Значні перспективи в цьому сенсі має метод дискретного часового еквайзера [24].

Список літератури

1. Дорф Р., Бишоп Р. *Современные системы управления*. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.
2. Толочко О. І., Чекавський Г. С., Бухта Н. О. та ін. Варіант спостережача потягозчеплення для систем векторного керування асинхронним електроприводом. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Електротехніка і енергетика*. Донецьк: ДонНТУ, 2007, вип. 7 (128). С. 14–18.
3. Шеремет О. І. Синтез систем автоматичного керування розташуванням полюсів та компенсацією нулів передаточної функції *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки*. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007, Тематичний вип. С. 458–459.
4. Zadeh L. A. Fuzzy sets, *Information and Control*. 1965. №8. pp. 338–353.
5. Jager R. J., Krugsnian A. J., Verbruggen H. B. et al. *Direct real-time control using knowledge-based techniques*. SCS, 1990. pp. 61–65.
6. Ha Q. P., Negnevitsky M. A robust modal controller with fuzzy tuning for multi-mass electromechanical systems. *Proceedings of the Australian and New Zealand Conference on Intelligent Information Systems*, 1995. pp. 214–219.
7. Банев Е. Ф. Моделирование энергосберегающего электропривода эскалатора метрополитена с фаззи-управлением. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. Кременчук: КрНУ, 2012, вип. 3/2012 (19). С. 533–536.
8. Усольцев А. А., Смирнов Н. А. Нечеткий регулятор в системе управления следящим электроприводом с ограничением по скорости. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. Иваново: ИГЭУ, 2011. – вып. 3. С. 27–32.
9. Haupt R. L., Haupt S. E. *Practical genetic algorithms*. New York: Wiley-Interscience, 2004. 272 p.

10. Клепиков В. Б., Махотило К. В., Обруч И. В. и др. Нейросетевая система управления электромеханической системой с отрицательным вязким трением. *Вісник Харківського державного політехнічного університету. Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. Харків: ХДПУ, 1998, Спеціальний вип. С. 378–380.
11. Клепиков В. Б., Асмолова Л. В., Обруч И. В. Влияние параметров электромеханической системы с нейрорегулированием, предотвращающим срывные фрикционные автоколебания, на ее динамические показатели. *Електромашинобудування та електрообладнання. Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. Київ: Техніка, 2006, вип. 66. С. 374–377.
12. Андриенко П. Д., Орловский И. А., Метельский В. П. Синтез базовой математической модели в виде модифицированной рекуррентной нейронной сети электромеханической системы с не полностью известной структурой. *Електротехніка та електроенергетика*. Запорожье: ЗНТУ, 2011, №1. С. 50–55.
13. Анисимов А. А., Горячев М. Н. Идентификация электромеханических систем с использованием искусственной нейронной сети. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. Иваново: ИГЭУ, 2008, вып. 3. С. 55–58.
14. Анисимов А. А., Анисимов А. А., Тарарыкин С. В. Методы параметрической оптимизации полиномиальных регуляторов электромеханических систем. *Електричество*. 2008, № 3. С. 52–58.
15. Клепиков В. Б., Палис Ф., Цепковский Ю. А. Гибридные нейронные сети в управлении нелинейными электромеханическими системами. *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Харків: НТУ “ХПИ”, 2003, № 10, Т. 1. С. 29–33.
16. Цепковский Ю. А., Палис Ф. Синтез скользящего нейро-фаззи регулятора для управления магнитным подвесом. *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Харків: НТУ “ХПИ”, 2005, № 45. С. 493–497.
17. Мещанов А. С. Методы построения разрывных управлений и поверхностей переключения в многомерных системах. *Известие вузов. Авиационная техника*. Казань: КГТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, 1981, № 2. С. 39–44.
18. Зеленов А. Б. Релейная система векторного керування асинхронним двигуном за ротором з можливістю регулювання реактивної енергії. *Електроінформ*. Львів: ЕКОінформ, 2006, № 4. С. 20–22.
19. Зеленов А. Б., Шевченко І. С., Морозов А. І. Синтез алгоритмів релейних керувань електроприводами механізмів з випадковим характером навантаження. *Електроінформ*. Львів: ЕКОінформ, 2007, № 2. С. 9–11.
20. Садовой А. В., Дереза А. Л. Параметрический синтез релейной системы подчиненного регулирования скорости электропривода с упругой связью. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. Кременчук: КДПУ, 2008, вип. 3/2008 (50), ч. 1. С. 83–87.
21. Фалдин Н. В., Руднев С. А. Синтез релейных систем методом фазового годографа. *Известие Вузов. Приборостроение*. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 1982, № 7. С. 32–36.
22. Рывкин С. Е., Изосимов Д. Б., Байда С. В. Регуляризация переключений компонент многомерного разрывного управления в реальном скользящем режиме. *Проблемы управления*. Москва: ООО «Сенсидат-Плюс», 2006, №1. С. 54–60.
23. Osmolovskii N. P., Maurer H. *Applications to regular and bang-bang control: second-order necessary and sufficient optimality conditions in calculus of variations and optimal control (advances in design and control)*. Philadelphia: Society for industrial and applied mathematics, 2012. 400 p.
24. Шеремет О. І., Садовой О. В., Сохіна Ю. В. Поняття дискретного часового еквайзера. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. Алчевск: ДонГТУ, 2014, вып. 1(42). С. 147–151.

References (transliterated)

1. Dorf R., Bishop R. *Sovremennye sistemy upravleniya* [Modern control systems]. Moscow: Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2002. 832 p.
2. Tolochko O. I., Chekavskiy H. S., Bukhta N. O. et al. Variant sposterihacha potokozheplennya dlya system vektornoho keruvannya asynkhronnym elektropryvodom [Option of the observer of the flow coupling for the systems of vector control asynchronous electric drive]. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Ser.: Elektrotekhnika i enerhetyka* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Electrical engineering and power engineering]. Donetsk: DonNTU, 2007, issue 7 (128). pp. 14–18.
3. Sheremet O. I. Syntez system avtomatychnoho keruvannya roz-tashuvannam polyusiv ta kompensatsiyeyu nuliv peredatochnoyi funktsiyi [Synthesis of systems for automatic control of the position of the poles and compensation of zeros of the transfer function]. *Zbirnyk naukovykh prats' Dniprodzerzhynskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnichni nauky* [Collection of scientific works of Dneprodzerzhinsk State Technical University. Technical sciences]. Dniprodzerzhynsk: DDTU, 2007. pp. 458–459.
4. Zadeh L. A. Fuzzy sets, *Information and Control*. 1965, №8. pp. 338–353.
5. Jager R. J., Krugsnian A. J., Verbruggen H. B. et al. Direct real-time control using knowledge-based techniques, SCS. 1990. pp. 61–65.
6. Ha Q. P., Negnevitsky M. A robust modal controller with fuzzy tuning for multi-mass electromechanical systems. *Proceedings of the Australian and New Zealand Conference on Intelligent Information Systems*, 1995. pp. 214–219.
7. Banev E. F. Modelirovanie energosberegayushchego elektropryvoda eskalatora metropolitena s fazzi-upravleniem [Simulation of energy-saving electric drive for metro escalator with fuzzy-control]. *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy. Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. Teoriya i praktyka* [Electromechanical and energy saving systems. Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kremenichuk: KmU, 2012, issue 3/2012 (19). pp. 533–536.
8. Usol'tsev A. A., Smirnov N. A. Nechetkiy regul'yator v sisteme upravleniya sledyashchim elektropryvodom s ogranicheniem po skro-sti [Fuzzy controller in the control system of the tracking drive with speed limit]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University]. Ivanovo: IGEU, 2011, issue 3. pp. 27–32.
9. Haupt R. L., Haupt S. E. *Practical genetic algorithms*. New York: Wiley-Interscience, 2004. 272 p.
10. Klepikov V. B., Mahotilo K. V., Obruch I. V. et al. Nejrosetevaya sistema upravleniya elektromekhanicheskoy sistemoj s otricatel'nyim vyazkim treniem. [Neural network control system of negative viscous friction electromechanical system]. *Visnyk Kharkivskoho derzhavnoho politekhnichnoho unyversytetu. Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. Teoriia i praktyka* [Bulletin of Kharkiv State Polytechnic University. Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kharkiv: KhDPU, 1998. pp. 378–380.
11. Klepikov V. B., Asmolova L. V., Obruch I. V. Vliyanie parametrov elektromekhanicheskoy sistemy s neyrourupravleniem, predotvrashchayushchim sryvnye friktsionnye avtokolebaniya, na ee dinamicheskie pokazateli [Influence of the parameters of an electromechanical system with neuromanagement, preventing shear frictional self-oscillations, on its dynamic performance]. *Elektromashynobuduvannya ta elektroobladnannya. Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. Teoriia i praktyka* [Electrical engineering and electrical equipment. Series: Problems of automated electric drive. Theory and practice]. Kyiv: Tekhnika, 2006, issue 66. pp. 374–377.
12. Andrienko P. D., Orlovskiy I. A., Metel'skiy V. P. Sintez bazovoy matematicheskoy modeli v vide modifitsirovannoy rekurrentnoj neyronnoj seti elektromekhanicheskoy sistemy s ne polnost'yu izvestnoj strukturoj [Synthesis of a basic mathematical model in the form of a modified recurrent neural network of an electromechanical system with a not completely known structure]. *Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka* [Electrical engineering and power engineering]. Zaporozhye: ZNTU, 2011, № 1. pp. 50–55.

13. Anisimov A. A., Goryachev M. N. Identifikatsiya elektromekhanicheskikh sistem s ispol'zovaniem iskusstvennoy neyronnoy seti [Identification of electromechanical systems using an artificial neural network]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University]. Ivanovo: IGEU, 2008, issue 3. pp. 55–58.
14. Anisimov A. A., Tararykin S. V. Metody parametricheskoy optimizatsii polinomial'nykh regulyatorov elektromekhanicheskikh sistem [Parametric optimization methods for polynomial regulators of electromechanical systems]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2008, № 3. pp. 52–58.
15. Klepikov V. B., Palis F., Tsepkovskiy Yu. A. Gibridnye neyronnye seti v upravlenii nelineynymi elektromekhanicheskimi sistemami [Hybrid neural networks in the management of nonlinear electromechanical systems]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut". Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektroprivoda. Teoriia i praktyka* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kharkiv: NTU "KhPI", 2003, № 10, vol. 1. pp. 29–33.
16. Tsepkovskiy Yu. A., Palis F. Sintez skol'zyashchego neyro-fazzi regulatora dlya upravleniya magnitnym podvesom [Synthesis of a sliding neuro-fuzzy regulator to control the magnetic suspension]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut". Ser.: Problemy avtomatyzovanoho elektroprivoda. Teoriia i praktyka* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kharkiv: NTU "KhPI", 2005, № 45. pp. 493–497.
17. Meshchanov A. S. Metody postroeniya razryvnykh upravleniy i poverkhnostey pereklyucheniya v mnogomernykh sistemakh [Methods for constructing discontinuous controls and switching surfaces in multidimensional systems]. *Izvestie vuzov. Aviacionnaya tekhnika* [News of universities. Aviation technology]. Kazan: KGTU-KAI im. A.N. Tupoleva, 1981, № 2. pp. 39–44.
18. Zelenov A. B. Releyna sistema vektornoho keruvannya asynkronnym dyuhunom za rotorom z mozhlyvystyu rehulyuvannya reaktivnoyi enerhiyi [Relay system of vector control of an asynchronous motor behind a rotor with the ability to regulate reactive energy]. *Elektroinform* [Electroinform]. Lviv: EKOinform, 2006, № 4. pp. 20–22.
19. Zelenov A. B., Shevchenko I. S., Morozov A. I. Syntez alhorytmiv releynykh keruvan' elektroprivodamy mekhanizmiv z vypadkovym kharakterom navantazheniya [Synthesis of algorithms of relay control of electric drives of mechanisms with random loading]. *Elektroinform* [Electroinform]. Lviv: EKOinform, 2007, № 2. pp. 9–11.
20. Sadovoy A. V., Derets A. L. Parametricheskyy sintez releynoy sistemy podchinennoho regulirovaniya skorosti elektroprivoda s uprugoy svyaz'yu [Parametric synthesis of the relay system of the subordinate speed control of the electric drive with elastic coupling]. *Visnyk Kremenchuts'koho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu* [Bulletin of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State Polytechnic University]. Kremenchuk: KDP, 2008, issue 3/2008 (50), vol. 1. pp. 83–87.
21. Faldin N. V., Rudnev S. A. Sintez releynykh sistem metodom fazovogo godografa [Synthesis of relay systems by the phase hodograph method]. *Izvestie Vuzov. Priborostroenie* [News of universities. Instrument making]. Saint Petersburg: University ITMO, 1982, № 7. pp. 32–36.
22. Ryvkin S. E., Izosimov D. B., Bayda S. V. Regularizatsiya pereklyucheniya komponent mnogomernogo razryvnogo upravleniya v real'nom skol'zyashchem rezhime [Regularization of switching of components of multidimensional discontinuous control in real sliding mode]. *Problemy upravleniya* [Control sciences]. Moscow: Sensidat Plus Ltd, 2006, № 1. pp. 54–60.
23. Osmolovskii N. P., Maurer H. *Applications to regular and bang-bang control: second-order necessary and sufficient optimality conditions in calculus of variations and optimal control (advances in design and control)*. Philadelphia: Society for industrial and applied mathematics, 2012. 400 p.
24. Sheremet O. I., Sadovoy O. V., Sokhina Yu. V. Ponyattya diskretnoho chasovoho ekvalayzera [Concept of discrete time equalizer]. *Sbornik nauchnykh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of scientific works of Donbas State Technical University]. Alchevsk: DonGTU, 2014, issue 1(42). pp. 147–151.

Надійшла 30.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шеремет Олексій Іванович (Шеремет Алексей Иванович, Sheremet Oleksii Ivanovich) – доктор технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, завідувач кафедри електромеханічних систем автоматизації; м. Краматорськ, Україна; e-mail: sheremet-oleksii@ukr.net